



TITLE:

# 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2019, 41: 23-39

ISSUE DATE:

2019-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/242806>

RIGHT:

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、\*は「新設研究室紹介」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科 (大学院)

##### 電気工学専攻

先端電機システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座  
(中村武研)

##### 電子工学専攻

集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性工学分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研) #

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研)

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創生部門先端電子材料分野 (藤田研)

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野 (西野研) \*

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研) ☆

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研)

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (橋口研)

生存圏開発創成研究系宇宙圏電磁環境探査分野 (小嶋研) \*

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

#### 学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアライゼーション研究分野  
(小山田研)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野  
(中村裕研)

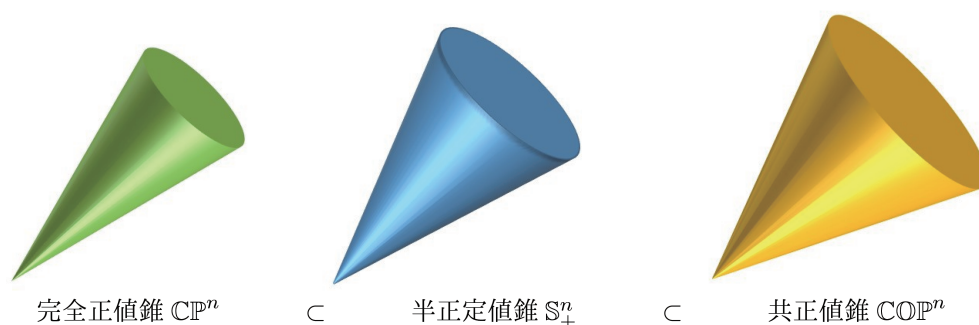


## システム基礎論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

<http://www-lab22.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「錐計画に基づく制御系の解析と設計」

制御工学分野においては、システムの解析や設計に関する多くの問題を半正定値計画問題（Semidefinite Programming Problem; SDP）と呼ばれる凸最適化問題に帰着できることがよく知られている。ここで、サイズが  $n$  の対称行列  $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$  が、“任意の  $n$  次元実ベクトル  $x \in \mathbb{R}^n$  に対して  $x^T P x \geq 0$  が成立する”という 2 次形式に関する非負条件を満足するとき、 $P$  は半正定値行列と呼ばれる。上記の SDP とは、半正定値行列で構成される凸錐上の最適化問題として記述されるものである。システムの解析や設計においては、リアプノフ関数をうまく構成することで目標値追従特性や外乱抑制特性といった所望の制御性能が達成されるかを判定することが多い。とくに線形システムを対象とする場合には、正定値行列を用いた状態ベクトルの 2 次形式をリアプノフ関数として採用することが有効であり、これが制御工学分野における多くの問題を SDP に帰着できる主たる理由であると考えられる。一方、線形システムの特別なクラスである非負システムの解析や設計においては、多くの問題を共正値行列で構成される凸錐上の最適化問題である共正値計画問題（Copositive Programming Problem, COP）として定式化できることが徐々にあきらかになってきている。ここで非負システムとは、いかなる非負の入力およびいかなる非負の初期状態に対しても、出力および状態が非負の値を取る動的システムのことである。このような非負性は、資源量、エネルギー、製品生産量、化学物質の濃度といった“負の値を取り得ない物理量のやりとり”を表すダイナミクスにおいて普遍的に現れるものであり、非負システム理論は制御工学のみならず経済学や社会システム工学、生物学といった多彩な分野で研究対象となっている。非負システムの解析や設計においては、状態ベクトルの非負性より、2 次形式リアプノフ関数を構成する対称行列として（狭義の）共正値行列を採用することが極めて自然である。ここで対称行列  $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$  が“任意の  $n$  次元非負ベクトル  $x \in \mathbb{R}_+^n$  に対して  $x^T P x \geq 0$  が成立する”という非負条件を満足するとき、 $P$  は共正値行列と呼ばれる。システム非負性を積極的に利用して解析や設計に関する問題を共正値計画問題として定式化することには、解析条件や設計条件にあらわれる行列に関する通常の半正定値制約を共正値制約に緩めることができるという大きな利点がある（図の錐の包含関係を参照）。しかしながら共正値計画問題には、1. 与えられた対称行列が共正値であるかどうかを判定すること自体が容易ではない、2. 半正定値計画問題の双対問題が同じ形式の半正定値計画問題として記述されるのに対し、共正値計画問題の双対問題は完全正値錐と呼ばれる（共正値錐とは異なる）凸錐上の最適化問題として記述される、といった数学的な難しさがある。本研究では、共正値計画に基づいた非負システムの解析や設計に対する新たなアプローチの構築可能性について、応用数学分野で半正定値計画や共正値計画に取り組む研究者と連携を取りながら検討を進めている。



図：完全正値錐、半正定値錐および共正値錐の包含関係

# 生体医工学講座 複合システム論分野（土居研究室）

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「格子不純物によって生じる局在モードの研究」

非接触給電技術は古くから盛んに研究され、既に実用化されている技術である。とくに、電磁誘導を用いる手法は身の回りのデバイスでもよく見かける。一方で、電力伝送効率のコイル間の結合係数に依存するため、受電デバイスの位置が給電コイル直上のみに限定されるという不便さがあった。このため、コイルを複数用いるなどして受電デバイスの水平自由度を向上させる試みなどがなされている。

多数の振動子が相互に結合された系、すなわち結合振動子系として、

$$\ddot{u}_n(t) = -\omega_0^2 u_n(t) - C(2u_n(t) - u_{n+1}(t) - u_{n-1}(t)), \quad (1)$$

を考える。いま、解を  $u_n(t) = a_1 e^{i(\kappa + \omega t)} + a_2 e^{i(\kappa - \omega t)}$  のような進行波と仮定すると、波数  $\kappa$  と角周波数  $\omega$  について、以下の関係が成り立つ。

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + 2C(1 - \cos \kappa)}. \quad (2)$$

上式を分散関係と言い、結合振動子系を伝搬する波動の波数と周波数の関係を与える。波数  $\kappa=0$  のとき、周波数は最小  $\omega_L = \omega_0$  となり、 $\kappa = \pi$  のとき最大  $\omega_U = \sqrt{\omega_0^2 + 4C}$  となる。したがって、なんらかの要因によって周波数が  $\omega_L$  以下、または  $\omega_U$  以上の振動が生じれば、その振動は進行波解と共鳴しないため、もとの場所で局在することになる。このような機序で生じるモードを局在モードという。式 (1) においては、例えば  $n=c$  の場所で共振周波数が他と異なる場合、 $n=c$  を中心とした局在モードが生じる（図2参照）。

本研究では、結合振動子として平面コイルとコンデンサからなる共振回路のラダー構造、およびアレイ構造を対象とする。図3は、本研究で検討対象とした平面コイルを直線状に配置した共振回路アレイ（ラダー構造）である。各平面コイルにはコンデンサが挿入されており、LC共振回路を構成している。このような回路では、格子不純物は外部から近づけられたコイルによって生じる。図4に、外部コイルによって生じた局在モードの例を示す [1]。外部コイルの位置を中心として電流分布が局在していることが分かる。

上記のように、局在モードの中心は外部コイルの位置に依存する。もし、共振回路アレイを送電側、外部コイルを受電側と考えると、常に受電コイル周りに電流が局在する状態が実現でき、受電デバイスの位置検出機構の簡素化が可能になると考えられる。実際の給電装置では、送電側に交流電源を接続し、局在モードを励起する必要がある。しかしながら、受電コイルを水平方向に移動させると、局在モードの周波数が変動することが明らかとなった。そこで (1) 隣り合う送電コイル間の重なり量、(2) 受電コイルの大きさ、をパラメータとして周波数変動を数値的に検討し、ある特殊な配置で局在モードの周波数変動をほぼゼロに抑制することが可能であることを明らかにしている [2, 3]。今後、このような特殊な配置になる理由や、2次元配列への拡張、および実験的な検証を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] 木村真之、松岩貴祐、谷口義治、松下泰雄, “相互誘導により結合された共振回路アレイにおける局在モードに関する一検討,” 信学技報 NLP2015-106, pp. 131-136 (2015).
- [2] T. Fujimoto, M. Kimura, S. Doi, “Localized Modes in a One-Dimensional Resonant Circuit Array Consisting of Overlapped Square Coils,” in Proceedings of the 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017), Cancun, Mexico, 2017, pp. 560-563 (2017).
- [3] 茂木大和、木村真之、土居伸二, “共振回路アレイにおける局在モードの周波数変動抑制のためのコイル配置の検討,” 信学技報 NLP2019 (in preparation) (2019).

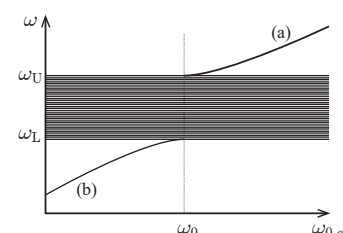


図1 不純物に対する局在モードの周波数の変化

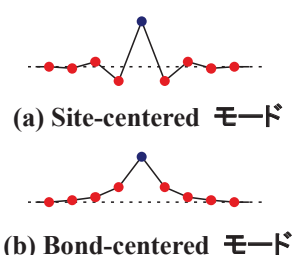


図2 局在モードの波形



図3 平面コイルを用いた1次元アレイ

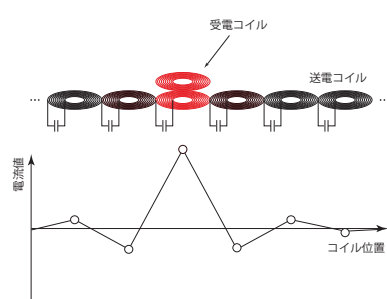


図4 受電コイルによる局在モードの発生

# 生体医工学講座 生体機能工学分野（小林研究室）

<http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「光ポンピング原子磁気センサを用いた磁気粒子イメージング」

当研究室では、生体磁気計測を主とした脳機能計測に向けて、微弱磁気信号の計測に向けて超高感度な磁気センサである光ポンピング原子磁気センサ（optically pumped atomic magnetometer：OPAM）の研究を進めている。OPAM は、光ポンピングにより生成されたアルカリ金属原子の電子スピン偏極の磁気光学効果を用いて微弱磁気信号を計測する磁気センサで、低周波数の磁気信号にも高い感度を有するという特長がある。

一方、幹細胞追跡や血管造影、血行動態に基づく脳機能イメージングなどへの応用が期待される磁気粒子イメージング（magnetic particle imaging:MPI）が考案され、近年活発に研究が行われている [1, 2]。MPI では、超常磁性酸化鉄（superparamagnetic iron oxide:SPIO）と呼ばれる磁性ナノ粒子（magnetic nanoparticle：MNP）の生体内における空間分布イメージングを行う。MNP は非線形な磁化特性を有しており、MPI では励磁磁場によりこの磁性ナノ粒子の磁化を変化させ、その磁化の変化を磁気信号として計測する（図1参照）。現在、動物を対象とした MPI 計測では数十 mT かつ数十 kHz の励磁磁場を印加することで高い信号対雑音比を実現しているが、生体への影響を考慮するとできる限り低い周波数かつ低磁場を用いた計測が望ましい。

そのため、当研究室では低周波数の励磁磁場による OPAM を用いた MNP 信号計測の研究を行っている。本研究では、OPAM への励磁磁場の影響を抑制するため、入出力コイルと共振用のキャパシタで構成されたフラクストランスフォーマ（FT）を用いた図2に示すような計測系を構築し、2 kHz の励磁磁場を用いた遠隔 MNP 信号計測を実施した。その結果、最小  $0.1 \mu\text{mol}$  の MNP から信号を取得することができた [3]。この研究で用いた OPAM と FT は、超低磁場 MRI 計測にも応用可能であることから、MRI により得られる解剖情報と MPI により得られる機能情報を統合するための同時計測の実現に向けて研究を進める。

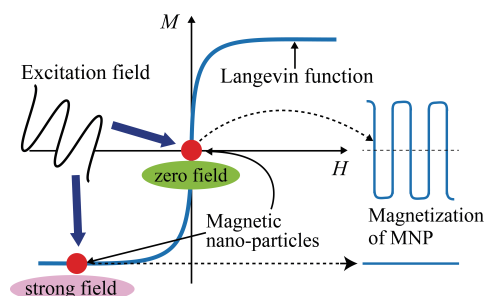


図1：励磁磁場(H)に対するMNPの磁化(M)の変動

## 参考文献

1. T.M. Buzug, *et al.*, Magnetic particle imaging, Springer, 2011
2. E.U. Saritas, *et al.*, Magnetic particle imaging (MPI) for NMR and MRI researchers, Journal of Magnetic Resonance, Vol. 229, pp. 116-126, 2013
3. 加藤 他、小型磁気センサモジュールを用いた遠隔磁気粒子イメージング：励磁磁場強度最適化の検討、信学技法、Vol.117, No.360, pp.61-66, 2017

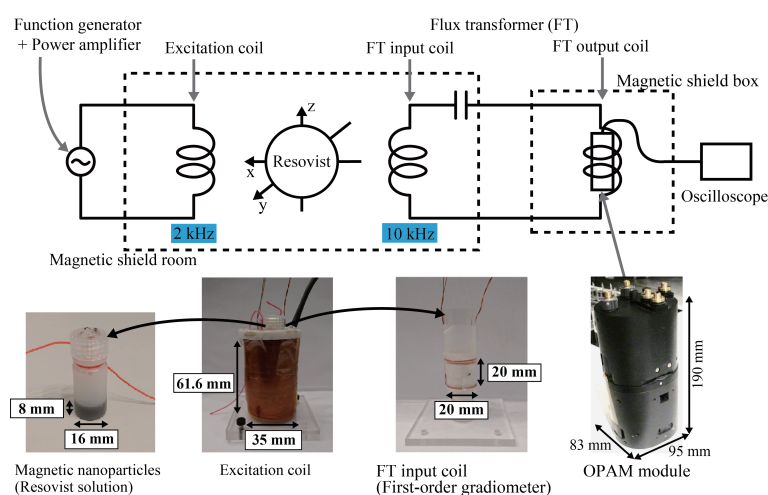


図2：OPAMを用いたMNP信号計測系のセットアップ



## 電磁工学講座 電磁回路工学分野（和田研究室）

<http://cct.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「微細 MOS トランジスタにおけるランダムテレグラフノイズの評価及びモデル化」

人々の生活にますます溶け込むようになっている集積回路において、低エネルギー動作と高信頼性が求められる。低エネルギー動作と高信頼性を両立するには、集積回路を構成する MOS トランジスタの I-V 特性だけでなく、トランジスタ間で発生する特性ばらつきとノイズを正確にモデル化することが鍵となる。数億個にも及ぶ大量トランジスタからなる集積回路は、自動設計ツールを用いた設計にて実現されるため、回路の性能と信頼性は設計に使うモデルに支配される。微細トランジスタが直面するノイズに電源ノイズのような外来ノイズとトランジスタ内で発生する熱雑音などがある。ナノメートル寸法の微細トランジスタにおいて、酸化膜内の欠陥にチャネルキャリアが捕獲され、捕獲されたキャリアがチャネルに放出されるといふランダムテレグラフノイズ (RTN) が問題となってきている。本研究では、この RTN の評価及びモデル化を行い、回路性能の正確な見積もり手法を検討している。

図 1 に MOS トランジスタの断面構造及びバンド構造を示す。キャリアの捕獲と放出によりオン電流が急変し、回路動作中の遅延変動に繋がる。図 2 に、ある回路において観測された遅延変動を時間に対してプロットしている。最大で 1% の遅延変動が観測されている。温度ごとに変動のパターンが変化し、最大変動量が異なる。温度以外に、電源電圧によってもその挙動が異なる。RTN はランダムな現象であるため、その影響を統計解析により見積もることで信頼性が保証される。そのため、RTN による変動量を統計モデルとして表現する。集積回路にゲート長とゲート幅の異なるトランジスタが用いられ、トランジスタ寸法の影響を統計分布のパラメータとしてモデル化する。

図 2 のように RTN は長時間の連続測定による評価が必要で、大量サンプルの評価が困難である。本研究では、独自の評価技術の開発により、長時間に渡る連続測定を自動で行うシステムを構築している。開発したシステムにより世界初の 154,224 個という大規模サンプルのノイズ評価に成功している。集積回路の信頼性において評価サンプルの数は大変有意義なものである。次に、ゲート長とゲート幅の異なるトランジスタにおいて温度や電源電圧の異なる動作条件におけるノイズを評価し、変動量の統計モデルの構築を行っている。図 3 (a) に 154,224 個のサンプルにおける遅延変動量のヒストグラムを示す。図 3 (b) にその変動量はガウス分布ではなく、lognormal 分布に従うことを Quantile-Quantile プロットにより示している [1]。

参考文献：[1] Islam et al, "Analysis of Random Telegraph Noise (RTN) at Near-threshold Operation by Measuring 154k Ring Oscillators," in *International Reliability Physics Symposium*, April 2019.

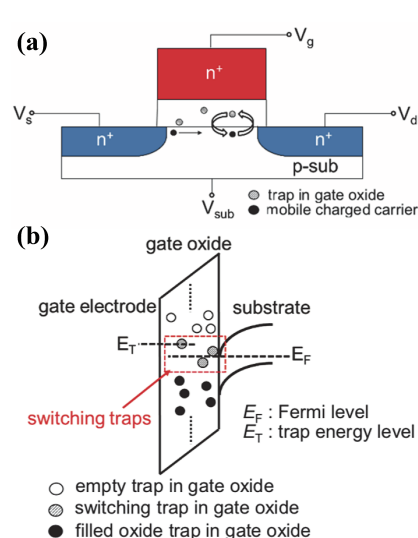


図 1：MOS トランジスタの酸化膜内の欠陥によるキャリアの捕獲・放出現象。

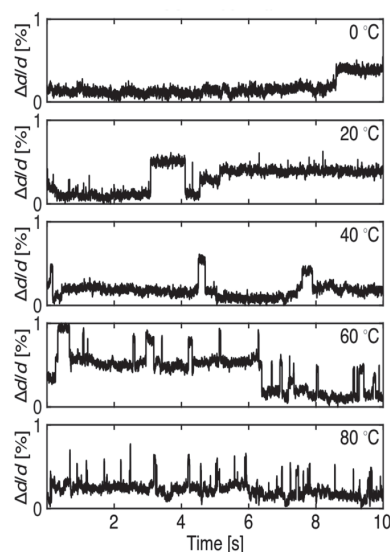


図 2：時間とともに遅延が変動する様子。この遅延変動は回路の誤動作に繋がる。

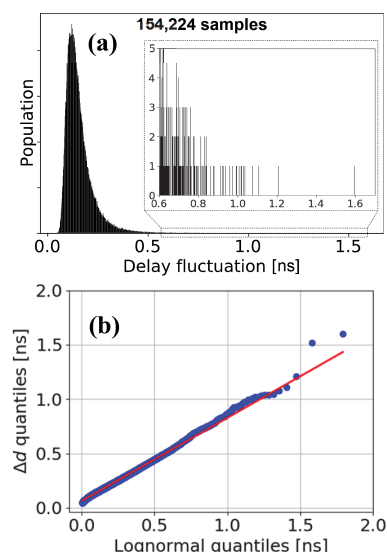


図 3：(a) 遅延のヒストグラム。(b) lognormal 分布に対する quantile-quantile プロット。

## 電子物理工学講座 応用量子物性工学分野（竹内研究室）

<http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

### 「光子を用いた、3量子ビットのゲート操作実現に成功」

近年、量子力学の基本的な性質を応用し、従来不可能であった計算や通信、計測、センシングなどを実現する「量子技術」が注目されており、たとえば盗聴不可能な通信を実現する量子暗号通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータの実現に向けた研究が進められています。光の素粒子である「光子」は、量子状態の保存性が良く、また長距離伝送が可能であることなどから、量子情報の有力な担体として研究が進められています。

これまでに、2つの光子間のゲート操作（2入力2出力ゲート素子）は実現されていますが、現在の効率が限られており、その集積化の上で問題となっていました。それを解決すると期待されるのが、3入力3出力ゲート素子の実現です。特に、制御スワップゲートと呼ばれる素子は、量子誤り訂正や、量子指紋認証など、様々な量子プロトコルに用いることが可能です。制御スワップゲート素子は、2入力2出力素子を組み合わせることで理論上可能ですが、その場合、成功確率は10万分の1以下となり、実現は事実上不可能でした。

この問題に対し、Fiurasek（フューラセック）らは、2008年に光の干渉計を組み合わせた独自の提案で、従来の500倍以上の効率（162分の1）で、制御スワップを実現する方法を理論的に提案しました。しかし、この方法を実現するには、非常に複雑な光干渉の長時間安定化など技術的な困難が多数存在し、これまで実現していませんでした。

そこで本研究グループは、Fiurasekが理論的に提案した方法に基づき、外部からの光量子ビットが入力可能な制御スワップゲート操作の実現に初めて成功しました。実験にあたっては、複数の特殊な半透鏡が、一つの光学部品に集積されたハイブリッド光学素子を巧みに組み合わせることで、非常に複雑な光回路を、長時間安定な光干渉計として実現するなど、技術的な課題を克服しました。制御スワップゲートは、制御ビットが1の場合のみ、2つの標的ビットの状態を入れ替えます。図1に実験結果を示します。入力の数字は、左端が制御ビットの値を、その右隣2つが、標的ビットの値を示します。また、高さは、そのような入出力値が得られた確率を表します。制御ビットが0の場合には、入力された標的ビットの状態は高い確率でそのまま出力されているのに対して、制御ビットが1の場合には、01は10に、10は01に高い確率で入れ替わっています。さらに、制御ビットに重ね合わせ状態を入力した場合に、3光子がもつれ合い状態が、生成されていることも確認しました。

今回実現した制御スワップゲートにより、従来の2入力ゲートを組み合わせた光量子回路に比べて、光量子回路の効率を大きく高めることが可能です。また、量子指紋認証など、量子状態を用いたさらに高度なセキュリティー技術の実現などが期待されます。

参考文献：T. Ono, R. Okamoto, M. Tanida, H. F. Hofmann, & S. Takeuchi, "Implementation of a quantum controlled-SWAP gate with photonic circuits", Scientific Reports, 7, 45353 (2017).

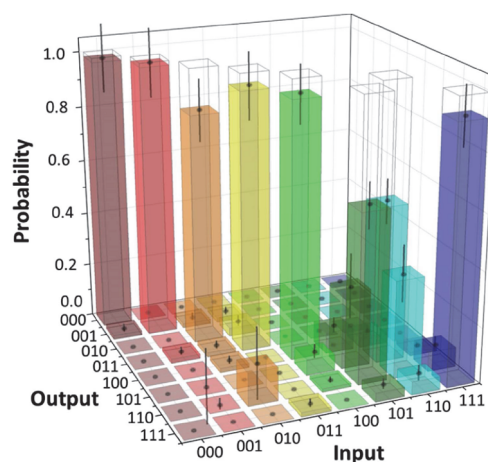


図1. 制御スワップ操作実験結果。

## 電子物性工学講座 半導体物性工学分野（木本研究室）

<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「SiC 電子デバイスにおける絶縁破壊現象の解析とユニポーラ限界特性」

耐圧 1~3 kV 級の SiC (炭化珪素) パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードは実用化が始まり、各種の電源、太陽電池用パワコン、電車、電気自動車などで顕著な省エネ効果が示されています。しかしながら、SiC 固有の半導体物性、欠陥物性、キャリア輸送現象には未解明のものが多く、依然として重要な研究課題となっています。特に、パワーデバイスにおいては高電圧印加時における pn 接合の絶縁破壊現象を理解し、これを精密に解析するモデルが要求されます。今回は、SiC 半導体 pn 接合の絶縁破壊現象の解析と、この研究を通じて検討した SiC ユニポーラデバイスの限界特性について紹介いたします。

様々な構造を有する SiC pn 接合ダイオードを作製して特性を解析したところ、耐圧 50 V ~ 20 kV 級の素子では、絶縁破壊はなだれ増倍によるアバランシェ破壊であることが判明しました。高電界下におけるキャリア増倍は衝突イオン化現象によるもので、半導体物性の観点では電子および正孔の衝突イオン化係数の電界強度依存性で記述することができます。本研究では、独自の構造により電界集中を完全に緩和した様々な SiC pn 接合ダイオードを作製し、その逆方向特性の光電流の電界強度依存性を基にして電子および正孔の衝突イオン化係数を算出しました。ダイオードの温度を広い範囲で変化させることにより、衝突イオン化係数の温度依存性も求めた結果を図 1 に示します。ここで、他の半導体には見られない SiC 特有の現象を 2 つ見出しました。一つは、低電界移動度の高い電子の方が、衝突イオン化係数が小さい（高電界では加速されにくい）ことで、もう一つは、温度上昇に伴い電子の衝突イオン化係数が若干増加傾向にある（通常はフォノン散乱の影響を受けて衝突イオン化係数は高温で減少）ことです。これらは SiC の特異な伝導帯構造に起因すると考えられます [1]。なお、本研究で得られた衝突イオン化係数を用いることにより、様々な SiC デバイスの耐圧を精密に予測することができ（実験値と計算値の差は約 3% 以下）、かつ実測耐圧の温度依存性も計算結果と非常によく一致を示すことを確認しています。

一般に、パワー MOSFET 等のユニポーラデバイスでは、デバイスのオン抵抗と耐圧の間に材料物性で決定されるトレードオフ関係が存在し、与えられた耐圧において達成できる最小のオン抵抗は「ユニポーラ限界」と呼ばれます。しかしながら、従来、SiC の分野では衝突イオン化係数や  $c$  軸方向移動度のドーピング密度依存性が確立されていなかったために、真のユニポーラ限界特性が曖昧でした。今回、衝突イオン化係数を精密に決定し、かつ並行して  $c$  軸方向の電子移動度のドナー密度依存性も実験的に決定することができましたので、SiC のユニポーラ限界特性を計算により求めました。実用上重要なパンチスルーの最適構造を計算により求め、オン抵抗と耐圧の関係をプロットした結果を図 2 に示します。従来、曖昧なまま示されていた特性に比べて、SiC の限界特性が格段によいことが分かりました [2]。

[1] T. Kimoto et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 363001 (2018).

[2] T. Kimoto, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 018002 (2019).

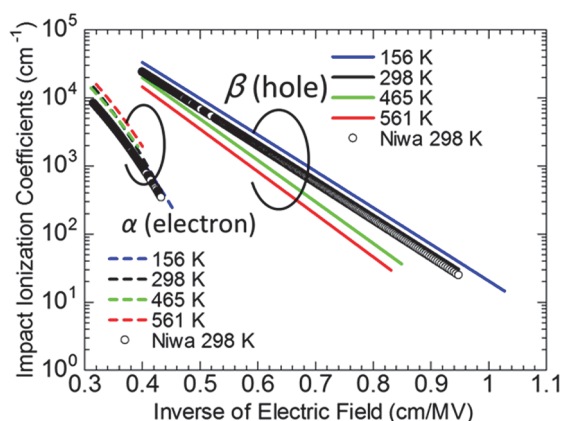


図 1 SiC における電子、正孔の衝突イオン化係数

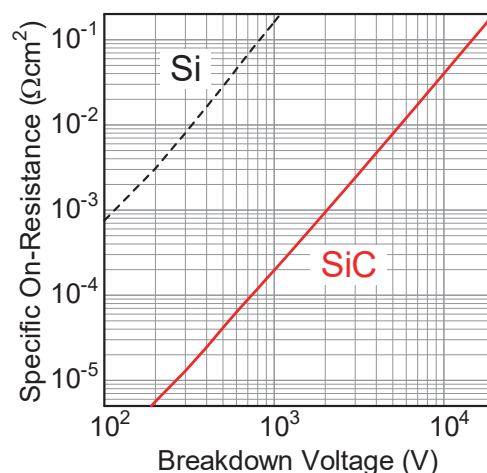


図 2 SiC デバイスのオン抵抗—耐圧の限界特性



## 量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「変調フォトニック結晶レーザーによる電子的ビーム走査」

近年、自動運転、ロボットの自動走行や、スマートフォンの高度顔認証等のセキュリティセンシングなどへの関心が、世界的に高まっています。そのために、LiDAR (Light Detection and Ranging) と呼ばれる、レーザーパルスの空間走査による物体（障害物）の検出や、不審物（者）のセンシング技術の開発が、世界中で行われています。しかしながら、現状では、センシングに用いるレーザーパルスの走査は、機械方式に頼らざるを得ないため、動作スピードが遅い、小型化が難しい、信頼性が低いなどの大きな課題を有しています。このような課題を解決しうる光源として、我々は、小型で安価な半導体レーザーに斜め方向へのビーム出射機能を付加するとともに、それらをアレイ状に並べることでレーザービームの出射方向を電氣的に走査できる、新たなフォトニック結晶レーザーデバイスの研究・開発を行っています。

図1は、望んだ斜め方向へのビーム出射を可能とするフォトニック結晶レーザーデバイスの概念図を示しています。このレーザーでは、一見するとランダムにも見える「変調フォトニック結晶」が重要な役割を果たします。変調フォトニック結晶は、正方格子状に周期的に配置された格子点に対して、規則的に、その位置に変調を与えた構造からなり、この規則的な変調の作用によって、レーザー光を回折させ、望んだ斜め方向へと出射させることが可能となります。図2には、このような変調フォトニック結晶を、出射方向が徐々に変化するように連続的に並べ、駆動電極をスイッチングした結果を示しています。同図に示されるように、複数の駆動電極を切り替えていくことにより、L字状にビームを走査することに成功しました。現在、このような新たな概念に基づき、2次元的に広い範囲でビーム走査が可能なレーザーチップの実現に向けて、研究を行っています。また、フォトニック結晶レーザーは、素子単体でナノ秒以下の非常に短い時間幅のパルスが発生させることも可能であるため、今後、測距分解能の向上なども含めて、革新的なセンサー用光源デバイスの実現へと繋がっていくことが期待されます。

## 参考文献

- [1] S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda, and Y. Tanaka, "Photonic-Crystal Surface-Emitting Lasers: Review and Introduction of Modulated-Photonic Crystals," IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. **23**, 4900107 (2017).

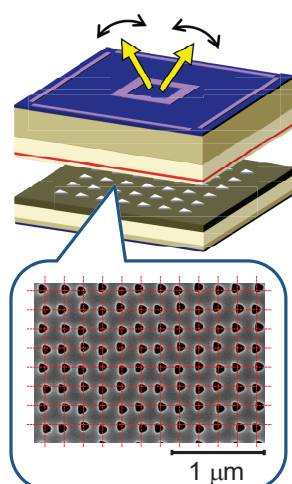


図1：斜め方向へのビーム出射を可能とする変調フォトニック結晶レーザー。

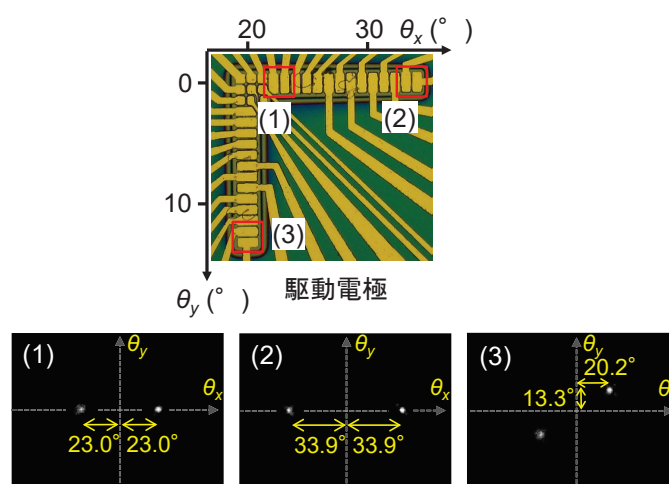


図2：アレイデバイスによるビーム走査。駆動電極のスイッチングにより、出射方向のL字状の走査を実現。

## 量子機能工学講座 量子電磁工学分野

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 電磁誘起透明化を実現するメタマテリアルを用いた電磁波の保存と再生

電磁誘起透明化現象 (Electromagnetically Induced Transparency の頭文字をとって EIT 現象) とは、3 準位系を基本とする原子系において盛んに研究されている非線形光学現象であり、プローブ光と呼ばれる光の吸収が、もう一つの補助的な光 (コントロール光) の入射によって消失する現象のことを指す。この透明化は極めて狭い周波数帯域で起こり、それに応じて媒質としての屈折率も大きく変化する。この屈折率の急激な変化は、媒質中のプローブ光の速度 (正確には群速度) を著しく低下させる要因となる。さらに、EIT 現象の動的な変調により、媒質中へ光を保存し、保存した光を再び取り出す (再生する) ことが可能になる。この手順を図 (a)-(c) に示す。まず、図 (a) のようにコントロール光が入射されている状態から開始する。ここにパルス状のプローブ光が入射すると、EIT 効果によりプローブ光はゆっくりと媒質中を進行する。ここで、同図 (b) のようにコントロール光を遮断することで、プローブ光の群速度は 0 になり、プローブ光は媒質中に保存される。その後、同図 (c) のようにコントロール光を再入射することで、EIT 効果によりプローブ光は低速度で媒質を再進行し、媒質外へ取り出される。

この光の保存と再生は、「光メモリ」を実現するものとして大きな注目を浴びている。しかし、動作周波数は原子種によって一意に決まるため、任意の周波数で実現できるものではない。これに対して、人工原子系ともいえるメタマテリアルによって EIT 現象を実現することにより、原理上任意の周波数で電磁波の保存と再生が可能になると考えられる。メタマテリアルとは、対象とする電磁波の波長よりも十分小さい人工構造の集合体のことを指し、設計により様々な媒質機能を実現できることから近年盛んに研究されている。EIT 現象に似た現象も様々なメタマテリアルで実現されてきたが、電磁波の入射で透明化を誘起するという本来の意味での EIT 現象は実現されていなかった。そこで、我々は非線形要素をメタマテリアル中に組み込むことで、EIT 現象を忠実に再現する方法を考案し、マイクロ波領域で電磁波の保存・再生の実験検証を行った。図 (d) がその実験結果であり、上段にプローブ波の出力信号、下段にコントロール波の出力信号を示している。コントロール波が遮断されている時間 (0ns ~ 30ns) の間、プローブ波の出力が減っていることが分かる。これは、プローブ波がメタマテリアル中に保存されていることを示している。そして、コントロール波が再入射されるとプローブ波が再生されて、出力信号として検出されていることが分かる。このように、原子系の EIT 現象による光の保存と再生と全く同じ手順で、人工原子系であるメタマテリアルで同現象を実現することに成功した。

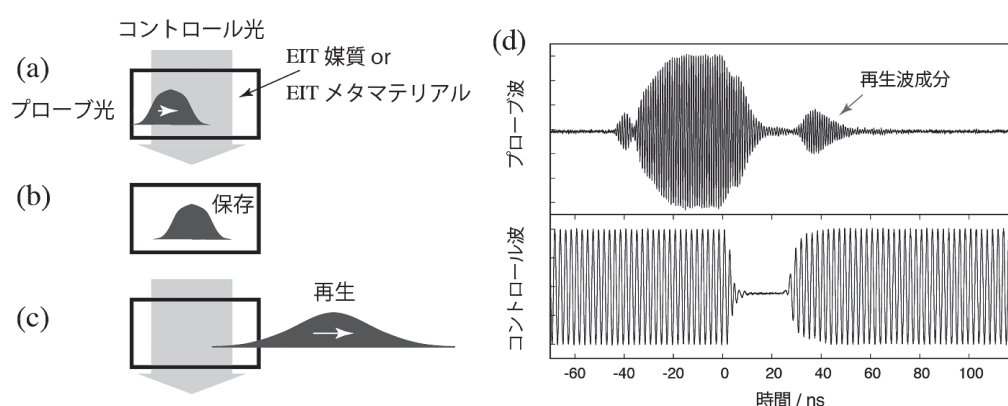


図 (a)-(c) EIT 現象を利用した電磁波の再生と再生の手順 (d) メタマテリアルを用いた電磁波の保存・再生の検証実験

参考文献 T. Nakanishi and M. Kitano, Appl. Phys. Lett. **112**, 201905 (2018).

## 集積システム工学講座 情報回路方式分野（佐藤高史研究室）

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「粒子フィルタを用いた光電脈波信号からの高精度な心拍数推定手法」

本研究室では大規模集積回路（LSI）を用いた応用システムの一つとして、生体信号処理に適したアルゴリズムや計算機システムについて研究を行っている。呼吸や心拍数等の生体信号を常時計測することにより身体に関する様々な情報が得られることが知られており、医療や健康維持、スポーツ等における応用が期待されている。本研究ではその中でも心拍数の常時計測に着目し、手首装着型のセンサにより高精度に心拍数を推定できる手法を検討している。

心拍数を測定するために用いられるセンサには多くの種類があるが、本研究では光電脈波式センサを用いる。この方式では図1のように皮膚に光を照射し、その反射光の強度を測定することにより脈波を感知する。血液中に含まれるヘモグロビンが緑色の光成分を吸収するため、血流変動により血管の容積が変化すると、それに伴い反射光の強度が変化し脈動を感知することができる。このセンサをバンド等により手首に固定することで、得られた脈波信号から心拍数の常時測定が可能となる。しかし、運動等による大きな体動が加わるとセンサ位置がずれ、光電脈波信号にノイズが加わり、心拍数の推定精度に悪影響を与える。本研究ではそのような大きな体動が加わった際にも高精度に心拍数を推定できるアルゴリズムの提案を行った。

提案手法では粒子フィルタと呼ばれるアルゴリズムを採用した。粒子フィルタは図2に示すように、粒子の粗密により状態の確率分布を表現し、その確率分布を時系列で追跡するアルゴリズムである。これにより、一時的に大きな体動ノイズが加わった際にも、時系列を考慮し最も可能性の高い心拍数を追跡することが可能となり、ロバストな心拍数推定を実現できる。また、提案手法では入力となる光電脈波信号と共に、センサから得られる加速度信号を使用する。粒子フィルタの処理中に加速度センサの情報を含めることにより、体動ノイズによる誤推定を減らすことができる。

12人の被験者データを対象に提案手法による心拍数推定精度を評価した所、平均絶対誤差 1.17 BPM (Beats Per Minute) の高精度な推定を実現した。これは既存手法の誤差 1.28 BPM より優れた結果であり、計算速度についても同手法に比べ約 20 倍高速である。粒子フィルタによる心拍数追跡の例を図3に示す。粒子の粗密は背景の色と等高線で表現されている。心拍数を確率分布として正確に追跡できていることが分かる。これにより、既存手法 JOSS（赤線）が一時的な誤推定をした際にも提案手法（黒線）は正確な推定が行えていることが分かる。

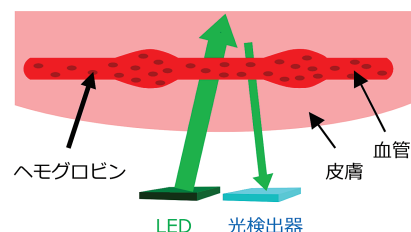


図1 光電脈波式センサによる脈波信号検出

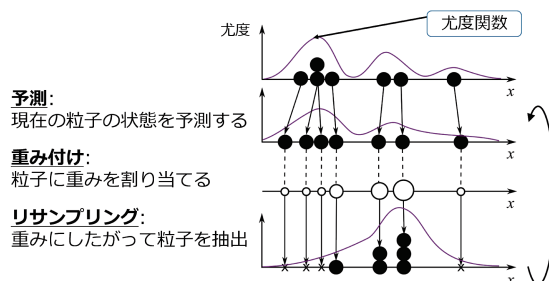


図2 粒子フィルタの概要

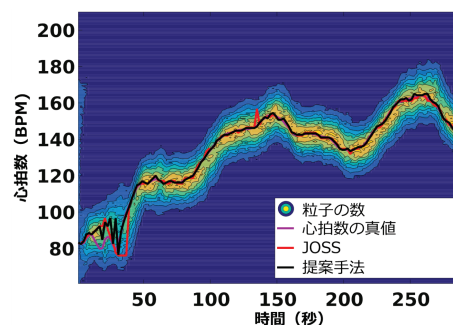


図3 提案手法による心拍数推定結果

## 参考文献

- [1] Yuya Fujita, Masayuki Hiromoto, and Takashi Sato: "PARHELIA: Particle Filter-Based Heart Rate Estimation from Photoplethysmographic Signals During Physical Exercise," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.65, No.1, pp.189-198, Jan. 2018.



## 集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤 亨研）

<http://pub-asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

### 「ミリ波超広帯域レーダーによるバイタルセンシング」

#### 1. 背景

生活習慣病の予防や日々の健康増進のために、様々な生体情報を常時モニターし、管理したいという要望が高まり、小型で高感度なセンサーをネットワーク経由でクラウド情報管理する様々なセンサーシステムが提案されています。しかし現状では、小型化されているとはいえ、多くのセンサーは身体に接触・装着する必要があるため、測定時にストレスを感じさせないカジュアルな生体情報センシングが強く求められていました。また、保育園や介護施設等では、子供や高齢者をプライバシーに配慮しつつ、ストレスなく見守ることのできる非接触の生体情報センサーシステムへの期待も高まっています。当研究室ではパナソニックと協同して、高感度なミリ波帯超広帯域レーダーをセンサーとして用い、独自の信号処理技術を組み合わせることによって、心電計と同程度の高感度な心拍／心拍間隔測定に取り組んできました。

#### 2. 研究手法・成果

呼吸や心臓の鼓動による人体表面の僅かな動きを、高い距離分解能を持つミリ波帯超広帯域レーダーによって高感度に捉え、特徴点の時系列パターンから心拍間隔を推定する独自のアルゴリズムによって、レーダー信号から、呼吸信号、心拍信号を分離し、平均心拍数だけでなく瞬時の心拍間隔変動までリアルタイムで推定します。当初は26GHz帯、次に60GHz帯のプロトタイプ機を用いて原理検証を行いましたが、昨年以降はさらに広帯域な79GHz帯を利用し、従来30cm程度であった距離分解能を7.5cmに向上すると共に、レーダーシステムの大幅な小型化（従来比1/10）を同時に実現しました。心拍間隔の推定精度に影響を与えるノイズを高精度に分離し、1台のレーダーによる複数人の心拍間隔の同時計測を実証しました。

#### 参考文献

- [1] 京都大学 COI 拠点プレスリリース  
[http://www.coi.kyoto-u.ac.jp/report\\_arch/201709\\_02](http://www.coi.kyoto-u.ac.jp/report_arch/201709_02)
- [2] T. Sakamoto, et al. Feature-based Correlation and Topological Similarity for Interbeat Interval Estimation using Ultra-Wideband Radar, IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol.63, No.4, pp.747-757, 2016.
- [3] T. Sakamoto, et al., Measurement of instantaneous heart rate using radar echoes from the human head, Electronics Letters, Vol.54, No.14, pp.864-866, 2018.
- [4] 大石健太郎 他, 人体表面変位の高調波成分に着目した超広帯域ドップラレーダによる非接触心拍間隔測定, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J101-C, No.11, pp.412-420, 2018.



図. 保育所における実証実験風景。

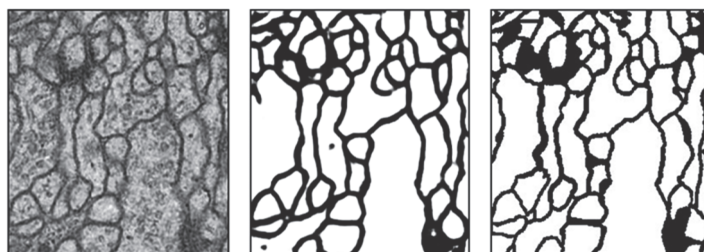
## システム情報論講座 論理生命学分野（石井研究室）

URL: <http://ishiilab.jp/kyoto/>

## 「深層学習による三次元生体画像処理」

深層学習は、画像、音声、言語の諸分野の応用研究を一変させた。深層学習の中核をなすアーキテクチャとして畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network; CNN）がある。これは畳み込み層とプーリング層を交互に多段に積み重ねたものである。畳み込み層とプーリング層の組み合わせは、位置不変性を維持した非線形フィルターを実現でき、それを多段に重ねることで、多重解像度の処理を実現できる。一方で、CNNに代表される深層ネットワークは多数のパラメータを有し、それをデータ駆動で最適化するためには、訓練用のビッグデータのみならず、最適化を効率化するため正則化が必要である。近年の深層学習の発展は、この正則化法の進展に支えられているといっても過言ではない。近年、対抗事例学習という新しい方法論が生まれ、そのバリエーションは多くの成功を収めている。その一つである、敵対的生成ネットワーク（generative adversarial network; GAN）は、識別器と生成器の組み合わせであり、生成器は訓練データに類似した偽のデータを生成し、識別器はその入力が訓練データセットの中にある真の訓練データであるか、生成器が生成した偽のデータであるかを識別する。これら二つの学習器は全体としてマルチエージェント学習によって訓練され、結果として、生成器は識別器のための正則化として機能することになる。ここでは、上記の背景に基づき、近年われわれのグループで開発された神経系の画像処理のための深層学習法を二つ紹介する。

マルチ走査型電子顕微鏡によれば、生体などの試料切片ごとの表面を、ナノオーダーの解像度で観察することができる。神経系では、シナプス後末端であるスパインと樹状突起とをつなぐ「首」部分はしばしば数ナノメートルの直径しかないので、電子顕微鏡からの三次元再構成による構造決定は困難な課題である。切片ごとの二次元画像に対して細胞分画（セグメンテーション）を行い、計算機上で三次元再構成を行う。その際に、二次元画面上で、あるいは、三次元画像スタック上でのセグメンテーションにおいて、深層学習アーキテクチャが用いられる。われわれは、CNNの多重解像度版であるU-netを生成器として、別のCNNを識別器として用いるGANを構築した。生成器は電子顕微鏡の二次元画像を入力として、その細胞分画画像を出力とするが、その際に、訓練データにおける、人手による分画を模倣する。識別器は、二次元画像と分画画像のペアが訓練データセットに含まれるか、あるいは、生成器により模倣的に生成された偽のペアであるかを識別する。この手法により、ナイーブなdata augmentationによることなく、高性能でのセグメンテーションが可能であることが分かった（右図）。



（左）電子顕微鏡画像（中）CNNによるセグメンテーション。黒は細胞膜。（右）人手によるアノテーション。

核磁気共鳴図により脳の構造画像を取得し、組織の三次元分画（例えば、白質と灰白質とに分ける）ことは、医療応用のみならず、個体間の構造の類似性と相違性を調べる研究（マクロコネクティクス）において重要である。深層学習器（ここでは、ResNetの三次元版であるVoxResNet）によれば、人手により行ったセグメンテーションを模倣するような自動セグメンテーションが可能と考えられるが、そこには問題点がある。第一に、深層学習器のパラメータが一般に多いため、訓練には大規模なデータセットが必要であるが、そのための人手のアノテーションには大きな負荷がかかる。第二に、深層学習器は、三次元の局所構造に基づくアノテーションを行うため、しばしばblob様なアーチファクトを導入してしまう。われわれは、脳画像の三次元変形と深層学習とを組み合わせた半教師付き学習法を開発した。三次元変形は脳画像の滑らかさを利用しているため、上記のアーチファクトを軽減することができる。深層学習のアノテーションを確率的なラベル生成過程としてとらえることで、少量の訓練データからでも、VoxResNetの学習とミスアノテーション過程の同定が可能であり、結果として、少量の訓練データセットからでも、アーチファクトの少ない自動セグメンテーションを可能とする深層学習器が獲得できることが分かった。



## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野（中村祐司研究室）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kondok/index-j.html>

## 「トカマクのヘリカル分岐平衡に関する研究」

当研究室では磁場閉じ込め超高温プラズマ、とくに軸対称性を持たないトーラスプラズマの閉じ込めに関して理論・シミュレーションと実験解析の立場から研究しています。

プラズマのトーラス型磁場閉じ込め装置では、磁場構造を工夫することにより性能の良い高温プラズマを閉じ込めることが可能です。トーラス型の中でも特にトカマク型装置は外部コイルとプラズマに流す電流により軸対称なプラズマを閉じ込めます。この電流量を大きくするほうが閉じ込め性能がよくなりますが、一方、電流量を大きくしすぎるとプラズマ自身が不安定になってしまい閉じ込めが壊れてしまいます。このため、電流分布を制御することにより、不安定性を避けつつ高性能なプラズマを閉じ込めることが大きな課題の一つです。たとえば、電流密度分布がトーラスの軸近傍で小さくなる分布は、不安定性を避けつつ高性能でありかつ長時間のプラズマ閉じ込めに有利であると考えられ、ITER（国際協力でフランスに建設中）ではハイブリッド放電と呼ばれ、JET（英国）、MAST（英国）、NSTX（米国）などでも実験研究がすすめられています。これ等の実験で最近明らかになったことは、トーラスの軸近傍が軸対称でなく、ヘリカル構造を持つことです。この非軸対称構造はプラズマの閉じ込め性能に影響を与えるため、近年、重点的に研究がすすめられています。その結果、ヘリカル構造の発現は、電磁流体平衡の分岐平衡解であることが理解されてきました。これは、プラズマ表面で軸対称な境界条件を課しても、軸対称解と非軸対称解の二つの解が得られることを意味します。そして、後者が実験で実現されていると理解されています。図1の上段は軸対称解、下段は非軸対称解の磁場構造を表します。

当研究室では、この非軸対称解が現れる機構を理解する目的で、分岐平衡解が得られる条件を電磁流体平衡方程式の数値シミュレーションにより調べています。その結果、分岐平衡解の出現条件が、プラズマの断面形状に強く依存することを明らかにしました。通常、トカマクプラズマの閉じ込めは、表面近傍で現れる不安定性を避けるために、断面形状を円形より図1のような楕円および三角形に近くしますが、これらの断面形状に対して分岐平衡が現れやすいことを新たに示しました。

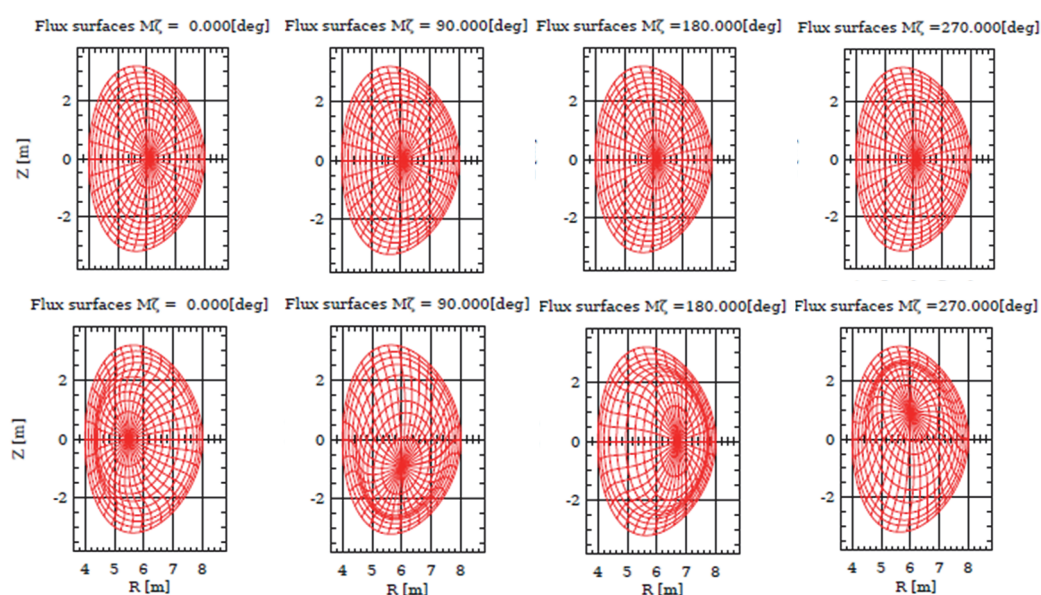


図1 電磁流体平衡方程式の数値シミュレーション結果。円柱座標  $(R, \theta, Z)$  の  $\theta=0$  度, 90 度, 180 度, 270 度それぞれの断面における磁場構造を赤線で表す。上段が軸対称解、下段が非軸対称解を表し、プラズマ表面の形状は同じである。



## エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（長崎研究室）

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

## 「マイクロ波の反射を利用したプラズマ電子密度計測」

本研究室では、荷電粒子と電磁界との相互作用を高度・高精緻に制御することにより 21 世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、電磁波によって生成・加熱された核融合プラズマの閉じ込め性能の改善と理解、高パワーミリ波を用いた加熱・電流駆動システムの開発、プラズマ乱流・揺動や高速イオン励起不安定性に関連したプラズマ計測と解析、自由電子レーザを代表とする先進量子放射源を実現するための高輝度電子ビームの発生や、慣性静電閉じ込めと呼ばれる方式の小型のプラズマ核融合装置の開発とその中性子源としての応用の研究を行っています。

プラズマの計測手法には多くのものがありますが、ここではマイクロ波を用いた「反射計」についてご紹介します。マイクロ波・ミリ波はレーダーとして利用されてきた歴史があり、最近では例えば車の衝突防止等のためのミリ波レーダーの開発が進められています。プラズマの計測では、マイクロ波を入射し、カットオフ層と呼ばれる反射層で反射されてきたマイクロ波を受信することでプラズマの電子密度に関する情報を得ることができます。マイクロ波が利用される理由は、実験室プラズマのプラズマ周波数と電子サイクロトロン周波数がマイクロ波周波数帯にあること、また、波長がちょうどプラズマの代表的な揺動の波長に対応することによります。正常波と呼ばれる伝搬モードを用いる場合は、電子密度が  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  程度の場合、周波数は Ka-band (24-40 GHz) と呼ばれる周波数帯域になります。受信した波の位相やアンテナに到達するまでの時間を測定することによってカットオフまでの距離を測ることができるため、周波数に対応する密度の位置の情報を得ることができます。また、カットオフ層での位相の時間変化を測定することにより電子密度の揺動やプラズマの回転速度を得ることができます。反射計システムには単純な構成のものから、非常に複雑なシステムまで存在し、設計者の考え方でいろいろなデザインをすることができることも特徴の一つです。

我々は核融合プラズマ実験装置 Heliotron J において電子密度の分布・揺動を求めるため、マイクロ波反射計の開発を進めてきました。図 1 は設計・構築したマイクロ波反射計の一つの概要図です。搬送周波数を 26GHz から 42GHz までスキャンできるようにし、周波数変調、ヘテロダイン検波をすることで位相の大きさとともに進行方向も検出可能なものとしています。図 2 はプラズマ放電の一例です。電子密度がある程度高くなるとエネルギー閉じ込めが良くなる現象が観測されており、これを H-mode 遷移と呼んでいます。この H-mode 遷移のときにマイクロ波反射計で計測した揺動が急激に減少していることがわかりました。また、同様のシステムをもう一台製作し、異なる周波数のマイクロ波を用いることで乱流の指標のひとつである密度の径方向相関長の評価を行うことも可能となりました。今後は、この反射計システムの多チャンネル化を進め、プラズマの回転分布や揺動計測に利用する予定です。こうした計測システムの開発を通し、現在建設中の核融合実験炉 ITER や将来の炉設計に役立つ高性能プラズマの物理解明や制御手法の確立を進めてゆきます。

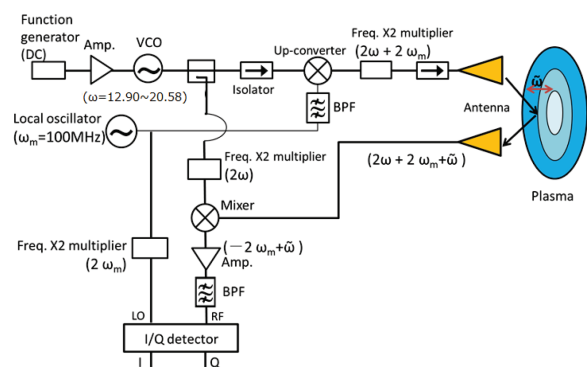


図 1. 開発したマイクロ波反射計システム概要図

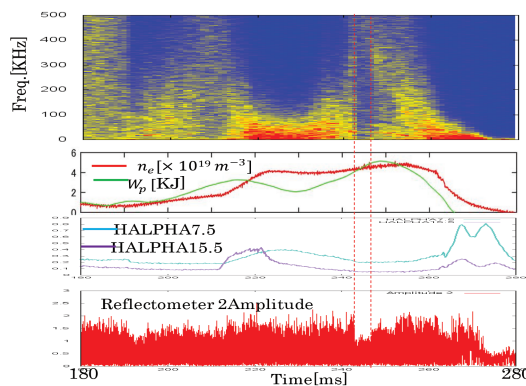


図 2. 反射計で計測した揺動の時間発展

## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/>

## 「プラズマへの燃料供給を制御して高性能プラズマを生成する」

私たちの研究室ではプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」を用いて、磁場閉じ込め方式による核融合プラズマの基礎研究をしています。具体的にはプラズマを高温・高密度で閉じ込める事のできる磁気容器（磁場配位）の最適化を行っています。最適かどうかを判断するためにはプラズマの輸送を調べる必要がありますが、その方法として、プラズマも固体や流体のような物質と同じく、質量・運動量・エネルギーの保存則に基づいた輸送方程式を解くことで、それぞれの輸送の性質（輸送係数等）を知る方法があります。ところで高温のプラズマに燃料ガスを注入すると、どのようなことが起こるでしょうか。第一には、燃料ガスはプラズマとの衝突することで電離し、イオン・電子密度の増加に寄与します。これは粒子輸送への影響に相当します。ですが実際には、両者の衝突は、プラズマの流れ（流速）を妨げる粘性（運動量輸送）や、電離・放射・荷電交換反応等によるエネルギー損失にも影響するため、単にプラズマ密度を上げるために多量の燃料を供給すれば良いという訳ではありません。

ヘリオトロンJで近年、高強度短パルスガスパフ法という燃料供給法を用い、高性能プラズマの生成に成功しました。この方法では短い時間（15ミリ秒）だけ、通常より数倍強い燃料供給を与え、その後燃料の供給を停止する方法です（図1参照）。燃料供給中にプラズマの電子密度は増加しますが、停止直後はプラズマの蓄積エネルギー（温度と密度の積：プラズマ圧力に相当）が若干下がります。回復し始めると初期の蓄積エネルギーを大幅に超えた高性能なプラズマが生成されました。この回復フェーズにおいて、燃料供給を停止しているにもかかわらず密度が増加するという現象も観測されています。このとき、プラズマの周辺部で、(1) 電子密度の空間勾配が急峻であること（図2参照）、(2) 磁力線と垂直方向（ポロイダル方向）のプラズマ流速の勾配も急峻になること（図3参照）がわかりました。理論的には流速の勾配が急峻になると、プラズマ中に発生する乱流による渦のサイズが小さくなり、乱流に起因した輸送を改善する役割があることが予想されています。別の計測からは燃料供給の停止後、燃料ガスの密度が数分の1になったことがわかっており、燃料供給の制御が、効率的な粒子供給による密度増加だけでなく、周辺部での粘性の低下に伴う流速の変化を生み、結果として全体的な輸送が改善したと推察されます。一方で、この手法では高い蓄積エネルギーの状態を長く維持することが課題となっており、追加の燃料供給手法の開発を進めています。

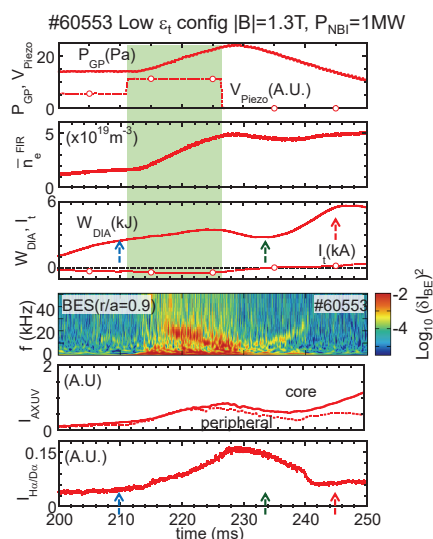


図1. 高強度短パルスガスパフ法を用いた放電波形。ここで  $\bar{n}_e$  は線平均電子密度、WDIA は蓄積エネルギー。

## 参考文献

X. Lu, S. Kobayashi, et al., Plasma Fusion Res., **13**, 1202077 (2018).

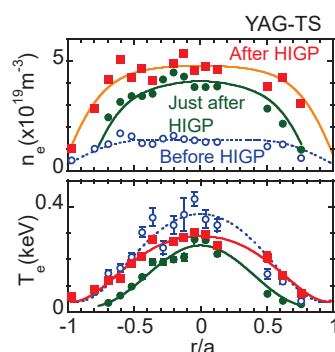


図2. 高強度ガスパフ法を用いた放電の電子密度・温度分布。

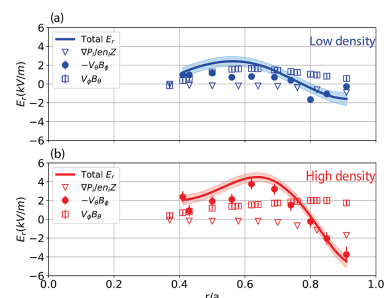


図3. (a) ガスパフ前および (b) 後におけるポロイダル方向のプラズマ流速の径方向分布。

## 生存圏診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野（山本研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/yamamoto-lab>

## 「赤道プラズマバブル活動度の日々変動に関する研究」

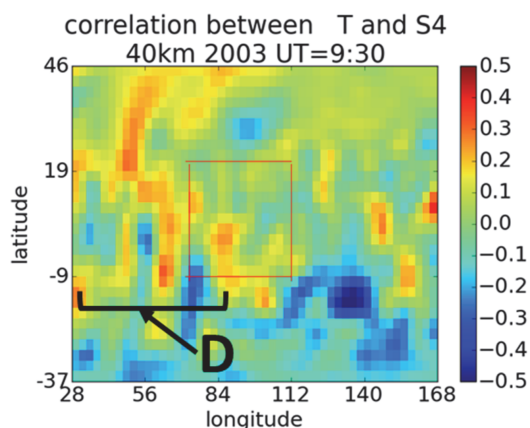
赤道プラズマバブル (Equatorial Plasma Bubble; 以後では EPB) は、低緯度および赤道電離圏で発生する強力な電離圏現象の 1 つである。EPB は、電離圏 F 領域の電離層プラズマの空乏層が不安定化し、高度 1000km まで急速に成長しつつ上昇する現象である。VHF レーダーによって、EPB に関連するプラズマの不規則性からの強いレーダエコーが測定できる。激しい EPB は、衛星から地上への電波通信に深刻なシンチレーションを引き起こし、また全地球航法衛星システム (GNSS) による測位の劣化を引き起こす。

EPB の成長メカニズムは、Rayleigh-Taylor の不安定性によって説明される。線形成長率の議論から、EPB が発生するための条件は、1) 電離層高度が高いことと、2) 東向き電場の増強である。これらの条件から、EPB の開始時間は多くの場合 F 領域高度の日没である。一方、EPB 出現の季節変化は、子午線に沿う電離圏の南北半球対称性によって説明される。つまり日没線が地磁気と平行であるとき、東向き電場の増強が日没と同時に一斉に生じ、EPB 出現頻度が高くなる。また多くの研究において、EPB 発生が大気重力波によることを示唆している。しかし、中性大気中の重力波から EPB 開始までの現実の物理プロセスの理解には、さらなる研究が必要である。本研究は、観測とシミュレーションの組み合わせによって、EPB 発生の日々変動と中性大気の挙動との関係の解明を目的とした。この論文は、Ogawa et al. [1] による先行研究の高度化でもある。

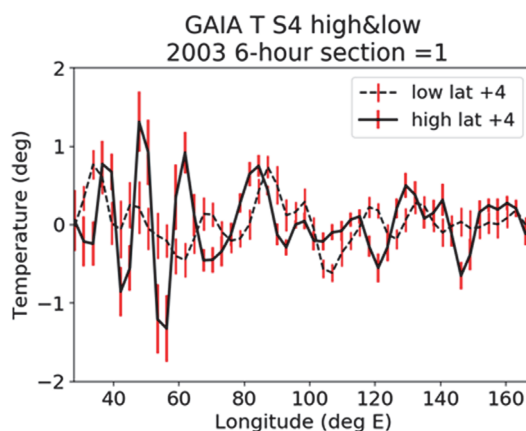
EPB 活動度の指標はインドネシアで観測された GPS 電波のシンチレーション指数 S4 とした。中性大気については、電離圏を含む全地球大気のシミュレーション GAIA の温度や風速を用いた。我々の研究から得られた新しい知見は、1) EPB 活動度と中性大気との相関関係が広い範囲で観測されること、2) EPB 活発日には気温および風速の振幅が増強されること、3) EPB 活発日に見られる大気擾乱の増大は電離圏における大規模波動の特徴と類似していること、等である。これらは、EPB と中性大気との結合をより明確に支持する結果となった [2]。

## 参考文献

- [1] Ogawa T, Miyoshi Y, Otsuka Y, Nakamura T, Shiokawa K (2009) Equatorial GPS ionospheric scintillations over Kototabang, Indonesia and their relation to atmospheric waves from below. *Earth Planets Space*, **61**, 397–410.
- [2] Yamamoto, M., Y. Otsuka, H. Jin, Y. Miyoshi (2018) Relationship between day-to-day variability of equatorial plasma bubble activity from GPS scintillation and atmospheric properties from GAIA assimilation, *Progress in Earth and Planetary Science*, **5**:26, doi:10.1186/s40645-018-0184-7.



GPS S4 指標の日々の変動と 2hPa (高度約 40km) の GAIA 温度との相関は、南緯が伸びた低緯度域の高相関領域 (「D」で示す) を示す構造。



EPB 活発日における GAIA 温度 (実線) は、EPB 不活発日のデータと比較して、経度方向のばらつきが増大する。



## 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野（篠原研究室）

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/shinohara-lab/>

### 「レクテナからの高調波再放射を利用したレトロディレクティブシステムの研究」

当研究室ではマイクロ波を用いた電波放射型無線電力伝送の研究開発を行っており、重要な研究課題の一つとして「受電システムの存在する方向に正確に無線電力伝送をすること」が挙げられる。この研究課題の解決策の一つとして「レトロディレクティブ」と呼ばれる手法がある。レトロディレクティブとは、受電システム側から送電システム側にパイロット信号を放射し、送電システム側でパイロット信号の到来方向を何らかの手法で推定して、パイロット信号到来方向に電波（マイクロ波無線電力伝送の場合はマイクロ波電力）を送り返す仕組みのことである。レトロディレクティブを構築するにはパイロット信号が必須となるが、当研究室ではレクテナ（受電アンテナ+整流回路）の整流回路の非線形性に着目して、整流回路で発生する高調波をパイロット信号として利用したレトロディレクティブシステムの研究開発を行った。レクテナに送電されるマイクロ波電力を利用してパイロット信号を生成するため、受電システム側にはパイロット信号用の発振器や電源は不要である。また、類似のシステムとしてRF-ID方式やバックスキッタ方式が存在するが、今回提案する手法は整流回路以降の後段回路が全く不要である点において非常に簡便なレトロディレクティブシステムを構築できる。

実際に構築した高調波再放射レトロディレクティブシステムの原理検証実験写真を図1左に示す。送電システムには周波数 2.45 GHz での 2 素子アレーアンテナを用いた。各アンテナからのマイクロ波出力は 20 W とした。送電システムから 4.6 m 離れた位置に半波長ダイポールアンテナを有するレクテナを設置し、レクテナの出力直流電力を計測した。一方で、レクテナから再放射される周波数 4.9 GHz の二次高調波の到来方向を推定した。到来方向推定システムでは、干渉計法により 2 素子の高調波受信アンテナ間の位相差を到来方向推定データとして出力し、そのデータを送電アレーアンテナの各素子の位相制御データに変換する。以上の構成により、高調波の到来方向すなわちレクテナが存在する方向にマイクロ波を自動的に送電することが可能となる。実験結果を図1右に示す。グラフの横軸および縦軸はそれぞれ送電アンテナの方向およびレクテナでの出力直流電力を示す。凡例の「ビーム制御なし」は、送電アレーアンテナの各素子を同位相で励振させたときの結果であり、送電アレーアンテナのビームパターンに相当するものである。「手動ビーム制御」は、回転台を回転させた際にレトロディレクティブシステムを用いずに、レクテナ方向へのビーム制御を手動で逐次実施した場合のパターンである。「レトロディレクティブシステム」は高調波再放射レトロディレクティブシステムを用いた場合のパターンである。実験結果より、レトロディレクティブシステムは手動ビーム制御と同等のビーム制御を自動で行えており、今回提案する高調波再放射レトロディレクティブシステムの原理実証に成功した。

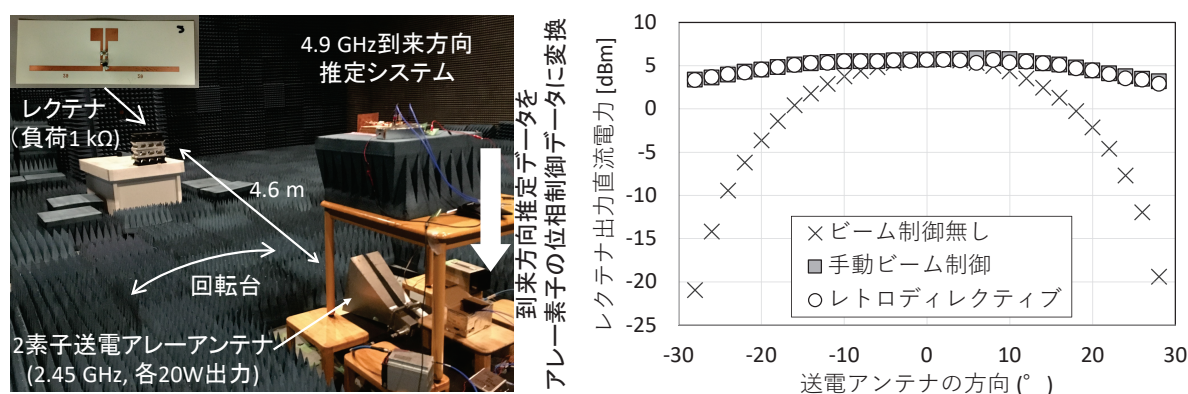


図1 高調波再放射レトロディレクティブシステムの原理検証実験写真（左）および実験結果（右）